第46卷 第5期
2023年5月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 5
May 2023

黄河流域七大城市群绿色发展效率测度及特征分析

孟望生[1]， 刘华桢[2]， 张 扬[3]

（1. 甘肃政法大学商学院，甘肃 兰州 730070； 2. 甘肃政法大学经济学院，甘肃 兰州 730070；
3. 陕西师范大学国际商学院，陕西 西安 710119）

摘 要： 黄河流域城市群绿色发展对于全流域生态保护与绿色高质量发展至关重要。采用超效率SBM模型测度黄河流域七大城市群所辖城市2007—2019年的绿色发展效率，对其时空演化特征进行刻画，并分别采用引力模型和均衡函数分析七大城市群间绿色发展的关联特征和城市群内部的均衡特征。结果表明：(1) 从时序特征来看，城市群的绿色发展效率以2014年为界呈现先下降后上升的变化趋势。(2) 从空间分布来看，城市群所辖城市的绿色发展效率在空间格局上呈现低效率空间集聚现象。(3) 从关联特征来看，不同城市群间绿色发展的关联强度存在较大差异，其关联关系主要有单向溢出关联、双向溢出关联和无关联。(4) 从均衡特征来看，城市群的绿色发展效率与其均衡度之间存在负相关关系，且各城市群在绿色发展效率和均衡度的关系上主要呈现低效率–高均衡度、低效率–低均衡度和高效率–低均衡度3种类型。

关 键 词： 绿色发展效率；城市群；关联特征；均衡特征；黄河流域

文章编号： 1000－6060(2023)05－0846－11(0846～0856)

黄河流域生态保护和高质量发展对于实现中国生态安全和经济高质量发展、推进不同区域间发展平衡具有重要的现实意义。为此，习近平总书记于2019年9月明确提出“黄河流域生态保护和高质量发展”是国家重大战略。黄河流域涵盖着山东半岛、中原、晋中、关中平原、宁夏沿黄、呼包鄂榆和兰西七大重点城市群。据《中国城市统计年鉴(2021年)》的数据计算可知，这七大城市群几乎囊括了全流域所有的重要城市，在汇聚全流域60.46%人口(共计8854.43×10^{4}人)的同时贡献着全流域67.68%(共计6.13×10^{12}元)的生产总值。可以说，七大重点城市群是黄河流域经济高质量发展的重中之重，直接决定着“黄河流域生态保护和高质量发展”这一国家重大战略的有效实施。而黄河流域城市群高质量发展的关键是绿色发展[1]。中共中央和国务院联合印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》指出要通过促进城市群内部要素高效流动、城市群之间高效协同来推进建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区；可见，城市群绿色发展的重点在于利用城市群的规划布局促进城市群内部及城市群之间绿色发展要素高效流动，即城市群绿色发展要同时兼顾内部均衡和外部协同。那么当前黄河流域城市群绿色发展水平如何？城市群之间绿色发展是否协同？城市群内部绿色发展是否均衡？研究并回答这些问题对于了解黄河流域城市群绿色发展现状，协调、均衡地推进黄河流域绿色发展具有重要的理论和现实意义。

绿色发展的核心是绿色发展效率的提升[2]，涉及绿色发展效率的研究成果主要有以下几个特征：第一，在研究范围上，学者们首先聚焦于全国范围内不同省份[3]或不同地市[4–5]对绿色发展效率展开研究；随着长江经济带、京津冀等区域成为国家重大战略发展地带，围绕某一区域范围测度绿色发展效率的研究也逐渐增多[6–7]。第二，在指标构建与测度方法选择上，现有研究多选取资本、劳动和资源为投入指标，国内生产总值(GDP)为期望产出指标，

收稿日期： 2022-08-17； **修订日期：** 2022-11-08
基金项目： 国家社会科学基金西部项目(22XJL009)资助
作者简介： 孟望生(1985-)，男，博士，教授，主要从事环境经济学和区域经济学研究. E-mail: mengwangsheng@163.com

环境污染物为非期望产出指标[8-9]；测度方法主要以数据包络分析法（DEA）及其衍生出的模型为主，比如线性规划模型[10]、超效率SBM模型[11]和窗口DEA模型[12]等。第三，在研究内容上，现有研究多关注绿色发展效率的时空变化特征[13]和影响因素[14]。

以上文献为本文研究城市群绿色发展的关联特征及均衡特征奠定了重要基础，但仍存在以下不足：第一，从研究对象看，针对黄河流域城市群绿色发展的研究相对较少；第二，从指标体系的构建看，现有研究较少将水资源这一刚性约束考虑在内，无法契合黄河流域绿色发展的现实特征；第三，从研究视角看，既有研究较少同时关注绿色发展效率在不同城市群间的关联特征和各城市群内部的均衡特征。为此，本文以黄河流域七大城市群为研究对象，结合黄河流域绿色发展水资源短缺的现实特征，在原有常规衡量指标的基础上将用水量纳入投入指标体系，采用超效率SBM模型测度七大城市群2007—2019年的绿色发展效率，刻画其时空演变特征，并进一步探索不同城市群间的关联特征及各城市群内部的均衡特征，以期为进一步高效、均衡、协调地提升黄河流域城市群绿色发展水平，促进城市群联动发展，进而全面带动黄河流域的高质量发展提供裨益的启示。

1　研究区概况

根据“十三五”规划纲要对全国城市群的划分，黄河流域共涵盖7个城市群。本文从城市群和流域2个维度框定研究对象，首先，依据各城市群发展规划的文件，将七大城市群所辖城市纳入考察范围；其次，将主体区划不在黄河流域的河北省、安徽省所辖城市剔除。最终研究对象界定为黄河流域七大城市群57个地级市（表1），其空间格局如图1所示。

2　数据与方法

2.1　指标选择与数据来源

绿色发展是强调通过低资源消耗、低污染排放实现经济增长与环境保护协调发展的发展模式[15]；实现绿色发展的核心在于提升绿色发展效率——即在实现经济增长的同时，也实现资源节约与环境污染减排，推动经济增长向低投入、低排放和高产出转变[16]。基于绿色发展效率内涵，在借鉴孟望生等[17]指标选取的基础上，将黄河流域水资源保护的刚性约束考虑在内——即将城市用水总量也纳入投入指标，构建绿色发展效率的指标体系（表2）。所有基础数据来源于历年《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》等，数据缺失部分均采用省级层面数据和地级市数据对比折算的方法予以补充。

2.2　研究方法

2.2.1　超效率SBM模型　超效率SBM模型[20]既能避免常规DEA模型下变量松弛性和径向带来的测量误差问题，又能解决多个有效决策单元之间的可比性问题。因此，将黄河流域城市群内每个城市视为一个决策单元，采用超效率SBM模型对各城市的绿色发展效率进行测度。具体公式如下：

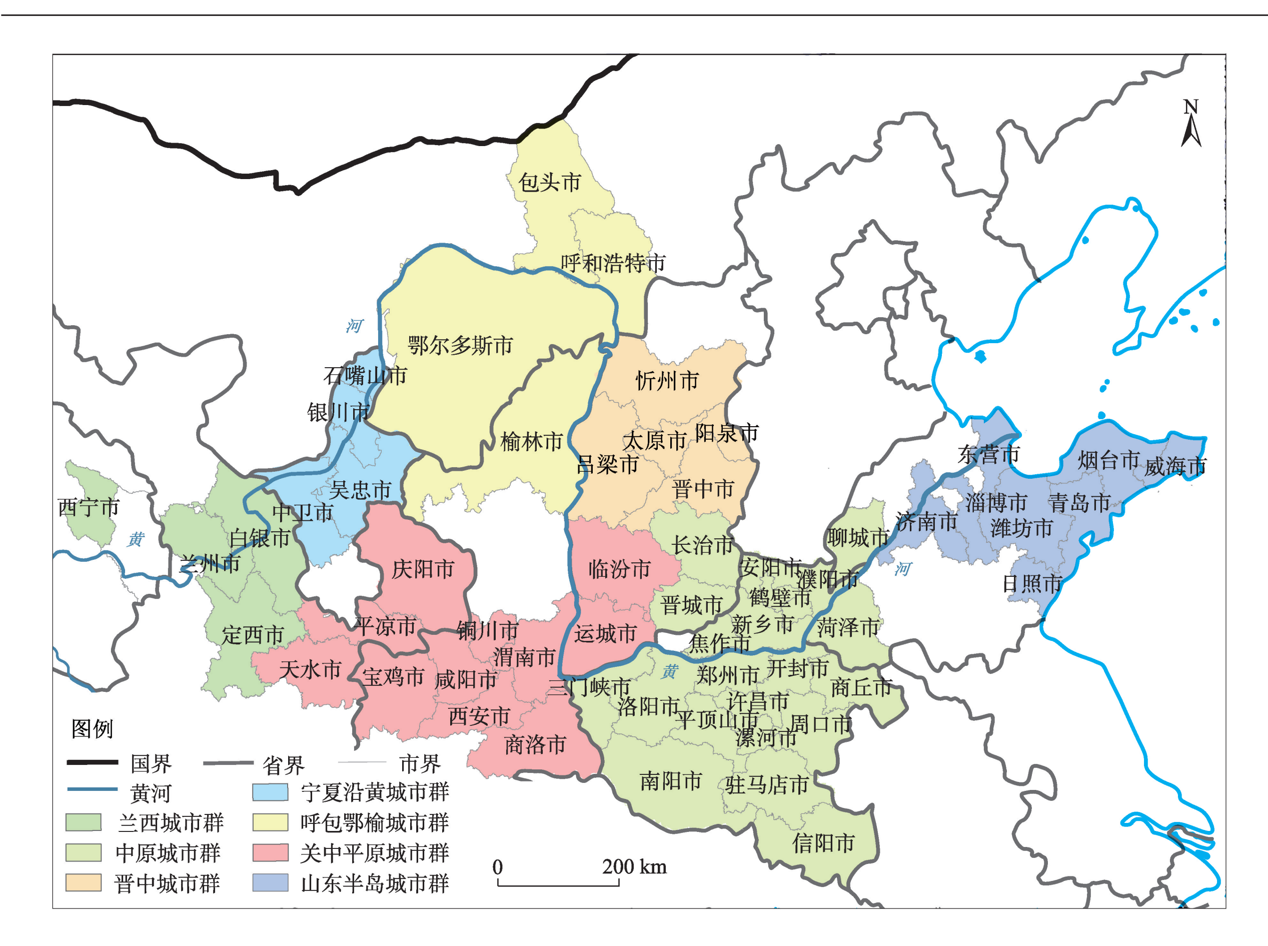
$$\rho=\min\frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{s_1+s_2}\left(\sum_{p=1}^{s_1}\bar{y}^d/y^d_{pk}+\sum_{q=1}^{s_2}\bar{y}^u/y^u_{qk}\right)} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\bar{x}\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}x_{ij}\lambda_j;\ \bar{y}^d\leqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y^d_{pj}\lambda_j;\ \bar{y}^u\geqslant\sum_{j=1,\neq k}^{n}y^u_{qj}\lambda_j\\ \bar{x}\geqslant x_k;\ \bar{y}^d\leqslant y^d_k;\ \bar{y}^u\geqslant y^u_k\\ \lambda_j\geqslant 0,\ j=1,2,\cdots,n;\ j\neq 0\\ i=1,2,\cdots,m;\ p=1,2,\cdots,s_1;\ q=1,2,\cdots,s_2\end{cases} \tag{2}$$

表1　黄河流域城市群划分情况

Tab. 1　Classification of urban agglomerations in the Yellow River Basin

城市群名称	城市构成	数量
山东半岛城市群	济南市、青岛市、烟台市、淄博市、潍坊市、东营市、威海市、日照市	8
中原城市群	郑州市、洛阳市、开封市、南阳市、安阳市、商丘市、新乡市、平顶山市、许昌市、焦作市、周口市、信阳市、驻马店市、鹤壁市、濮阳市、漯河市、三门峡市、长治市、晋城市、聊城市、菏泽市	21
关中平原城市群	西安市、宝鸡市、咸阳市、铜川市、渭南市、商洛市、运城市、临汾市、天水市、平凉市、庆阳市	11
晋中城市群	太原市、晋中市、吕梁市、阳泉市、忻州市	5
呼包鄂榆城市群	呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市、榆林市	4
宁夏沿黄城市群	银川市、石嘴山市、吴忠市、中卫市	4
兰西城市群	兰州市、西宁市、白银市、定西市	4



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 黄河流域城市群

Fig. 1 Urban agglomerations in the Yellow River Basin

表2 绿色发展效率测度变量及数据说明

Tab. 2 Measurement variables and data description of the green development efficiency

指标	变量	数据说明
投入	资本投入/10^8元	资本存量。参照孟望生等[18]的作法，采用永续盘存法测算
	劳动投入/10^4人	城镇从业人员数
	能源投入/10^8 kwh	全社会用电量。基于电力消费由电表记录更具准确性且其与能源存在高相关性[19]的考虑，采用全社会用电量衡量能源投入
	用水投入/10^4 t	城市用水总量
期望产出	经济产出/10^8元	地区实际GDP（2006年不变价）
非期望产出	烟（粉）尘排放/10^4 t	工业烟（粉）尘排放量
	SO_2排放/10^4 t	工业SO_2排放量
	废水排放/10^4 t	工业废水排放量

式中：ρ为绿色发展效率值；m、s_1、s_2分别为投入、期望产出和非期望产出的个数；u为期望矩阵；d为非期望矩阵；$\bar{x}$、$\bar{y}^d$、$\bar{y}^u$分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量；k、j为不同的决策单元；x_{ik}、y^d_{pk}、y^u_{qk}和x_{ij}、y^d_{pj}、y^u_{qj}分别为第k和j个决策单元的第i项投入、第p项期望产出和第q项非期望产出；x_k、y^d_k、y^u_k分别为第k个决策单元的投入、期望产出和非期望产出；λ_j为第j个决策单元的权重；n为决策单元的数量。

2.2.2 引力模型 在传统经济引力模型[21]的基础上引入绿色发展效率，采用修正的引力模型测算城市群绿色发展的关联强度，计算公式为：

$$R_{ij}=k_{ij}\frac{\sqrt[3]{\mathrm{POPU}_i\mathrm{GTFP}_i\mathrm{GDP}_i}\sqrt[3]{\mathrm{POPU}_j\mathrm{GTFP}_j\mathrm{GDP}_j}}{\mathrm{DIS}_{ij}^2} \tag{3}$$

$$k_{ij}=\frac{\mathrm{GTFP}_i}{\mathrm{GTFP}_i+\mathrm{GTFP}_j} \tag{4}$$

式中：R_{ij}为i、j城市群间的关联强度；k_{ij}为i城市群绿色发展效率对i、j城市群间绿色发展关联度的贡献率；POPU_i、GTFP_i、GDP_i和POPU_j、GTFP_j、GDP_j分别为i和j城市群的年末总人口、绿色发展效率和地区生产总值；DIS_{ij}为i、j城市群间的最短空间距离。

2.2.3　均衡函数　参照刘杨等[22]的作法，采用均衡函数计算各城市群的绿色发展均衡度，具体公式如下：

$$\varphi=-\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i}^{n}(x_i-\mu)^2+\varepsilon} \tag{5}$$

式中：φ为城市群绿色发展均衡度；x_i为i城市的绿色发展效率；n为城市群所辖城市数量；μ为城市群的绿色发展效率值；ε为取值0.5的均衡常数。

3　结果与分析

3.1　黄河流域城市群绿色发展效率时空演变特征

以2007—2019年黄河流域城市群所辖57个城市为样本，将上述三大类指标的数据引入超效率SBM模型，对绿色发展效率进行测算。首先，由黄河流域绿色发展效率时间演变图（图2）可以发现，样本期内城市群绿色发展水平均较低，且以2014年为界呈现先下降后上升的变化趋势。具体而言，2007—2014年绿色发展效率由0.4383下降至0.3928，下降幅度为10.38%；该阶段正值2008年全球金融危机爆发，经济的大幅下滑使得各城市对GDP的重视程度远超环境质量，不利于绿色发展；为了刺激经济，中国于2009年开始实施以带动工业发展为主的财政刺激计划，但黄河流域中仅山东半岛城市群的工业化水平较高，故该计划对流域经济发展水平的提振作用有限，伴随而来的却是资源的大量消耗及环境污染，使得绿色发展效率持续下降。2014—2019年绿色发展效率由0.3928上升至0.4552，上升幅度为15.89%；这与2014年后以习近平总书记为核心的新一代中央领导集体高度重视黄河流域的绿色发展状况有直接关系。进一步，通过绘制前（2007年）、中（2010年和2014年）、末（2019年）3个时期绿色发展效率的核密度图（图3）可以发现，同样以2014年为界，在此之前核密度曲线逐渐向左偏移，在此之后则向右偏移；这与前文分析中图2显示的结果相一致，印证了城市群的绿色发展效率呈先下降后上升的变化趋势。此外，核密度图显示绿色发展效率呈双峰状态且侧峰峰值较低，说明城市群绿色发展水平呈现两极分化现象。这是因为城市群内各城市的经济基础和发展条件各不相同，绿色发展效率存在差异，如山东半岛城市群中的城市不仅经济基础好，而且还实施“腾笼换鸟”等战略推进产业结构升级，其绿色发展效率则较高；而宁夏沿黄城市群中的城市不仅经济基础薄弱，而且偏重能源产业，经济发展多以牺牲环境为代价，故绿色发展效率较低。

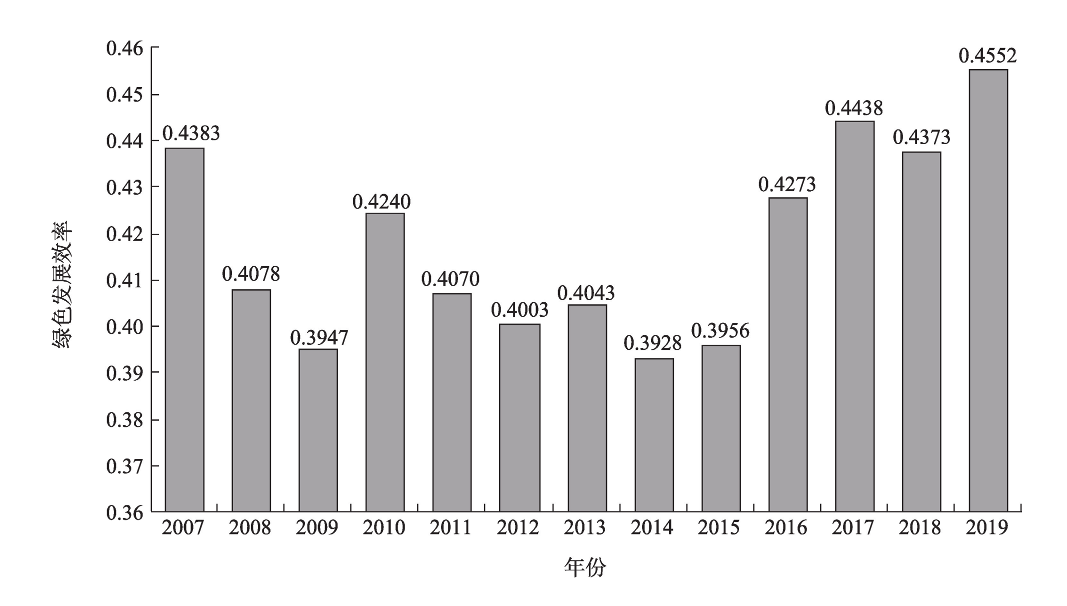


图2　2007—2019年黄河流域绿色发展效率时间演变

Fig. 2　Temporal evolution of green development efficiency in the Yellow River Basin during 2007—2019

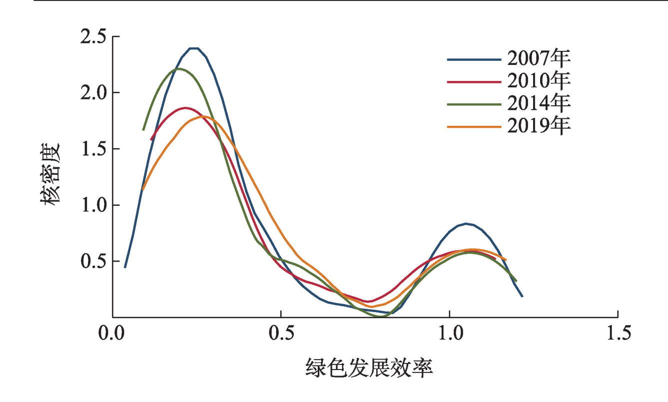


图3 不同时期黄河流域绿色发展效率的核密度

Fig. 3 Kernel density of green development efficiency in the Yellow River Basin in different periods

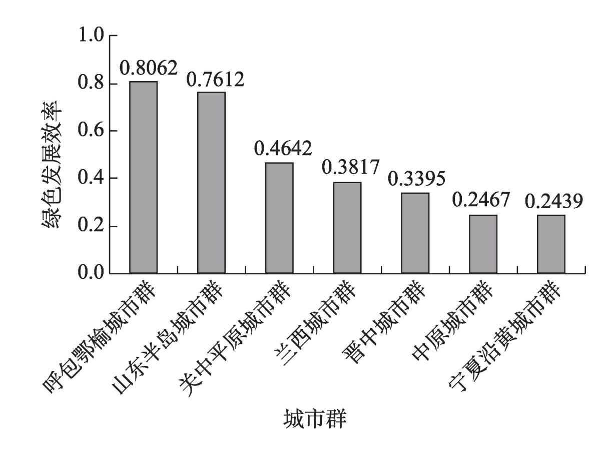


图4 2007—2019年黄河流域七大城市群绿色发展效率

Fig. 4 Green development efficiency of the seven urban agglomerations in the Yellow River Basin during 2007—2019

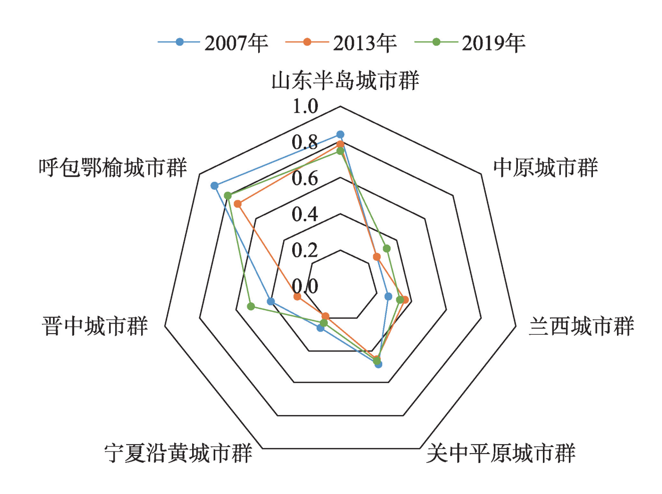


图5 2007—2019年黄河流域七大城市群绿色发展效率雷达图

Fig. 5 Radar map of green development efficiency of the seven urban agglomerations in the Yellow River Basin during 2007—2019

其次，由黄河流域七大城市群绿色发展效率直方图(图4)可以发现，不同城市群的绿色发展效率存在显著差异，呼包鄂榆和山东半岛两大城市群的绿色发展效率明显高于其他城市群；而宁夏沿黄城市群的绿色发展效率明显低于其他城市群。主要原因在于，呼包鄂榆城市群所辖4个城市均为能源经济强市，经济基础雄厚，对绿色发展的驱动作用较强，故绿色发展效率最高；山东半岛城市群高度重视产业绿色转型，并将政策倾斜于发展高新技术产业，有利于实现绿色发展，故绿色发展效率位列第二。而宁夏沿黄城市群不仅生态环境脆弱，还受国家产业结构战略调整的影响丧失传统能矿采掘业的优势，发展规模受限，故绿色发展效率最低。进一步，通过绘制前、中、末3个时期城市群绿色发展效率的雷达图(图5)可以发现，虽然呼包鄂榆和山东半岛城市群的绿色发展效率长期优于其他城市群，但其绿色发展效率在样本期内有所下降，且年均增长率均为负值(分别为-0.83%和-0.90%)，这是因为呼包鄂榆城市群的主要产业为矿产资源，国家整改能源产业的策略会影响其绿色发展效率的增长速度；山东半岛城市群仍存在绿色技术创新水平落后和资源环境配置体系不合理等问题，无法为提升绿色发展效率提供持续的动力，故绿色发展效率的增长速度有所减慢。此外，需要引起重视的是，宁夏沿黄城市群处于绿色发展效率(0.2439)和年均增长率(-1.02%)“双滞后”的状态，这是因为该城市群经济发展高度依赖资源和生态系统，绿色转型和污染治理任务艰巨，同时还存在产业结构层次低、创新驱动力弱等问题，更难以提升绿色发展速度。

最后，借助ArcGIS软件采用自然断点法绘制各城市绿色发展效率在2007、2013年和2019年的空间格局演化图(图6a~c)可以发现，不同时期城市群绿色发展效率的空间格局基本相似。具体来说，由图6a可见，呼包鄂豫和山东半岛城市群内大部分城市的绿色发展水平较高，兰西和宁夏沿黄城市群内部城市的绿色发展效率则普遍不佳，关中平原城市群内部城市的绿色发展效率呈现西部高、东部低的空间格局，而晋中和中原两大城市群的空间格局则表现出相似性，二者均分别以核心区域太原市和漯河市为中心呈现中心高值、外围普遍低值的特征；总体来看，七大城市群中高效率城市数量较少，且大部分地区呈现低效率空间集聚现象，这是因为早

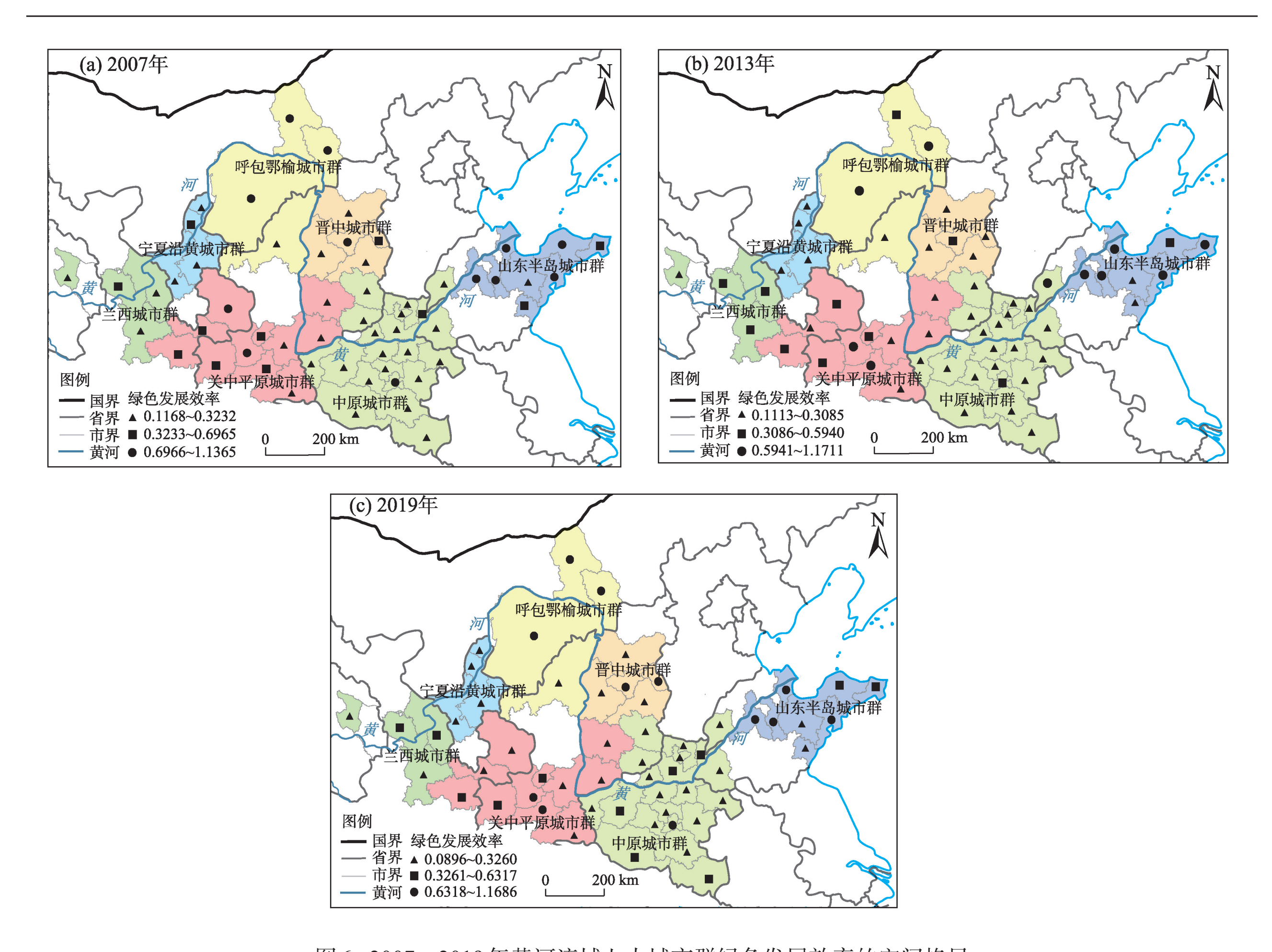


图6　2007—2019年黄河流域七大城市群绿色发展效率的空间格局

Fig. 6　Spatial patterns of green development efficiency of the seven urban agglomerations in the Yellow River Basin during 2007—2019

期众多城市依赖于资源要素的投入，绿色发展任重道远，且城市群存在较强的马太效应，导致低效率城市集聚。由图6b可见，2013年各城市绿色发展效率的空间格局与2007年基本保持一致，同时出现了部分城市效率值下降的现象，如银川市和包头市等；主要原因在于，2013年中共十八届三中全会提出产业转型升级的要求，而银川市和包头市等资源型城市产业结构单一，面临转型困难、发展受限等问题，故绿色发展效率下降。由图6c可见，2019年各城市绿色发展效率的空间格局与之前基本保持一致，同时出现了部分城市效率值上升的情况，如中原城市群中的洛阳市、新乡市、南阳市等；这主要得益于《促进中部地区崛起规划(2016—2025年)》的发布，使得恰处于中心地带的这些城市有效发挥了辐射带动作用。此外，值得重视的是，处在各大城市群交界地带的城市往往绿色发展水平较低——即城市群交界地带容易形成绿色发展"洼地"，如三门峡市、运城市和吕梁市等边缘城市；这是因为大部分污染物具有空间可流动性，城市群间环境污染排放会存在"以邻为壑"的现象，边缘城市则是最容易接受到污染转嫁的地方，故绿色发展水平往往不佳。

3.2 黄河流域城市群间的关联特征

通过引力模型计算七大城市群间绿色发展效率的关联强度，取关联强度中各行的均值为阈值，若引力值高于阈值则在关联矩阵中取值为1，表明该引力值对应行和列上的城市群存在绿色发展关联关系；反之，若引力值低于阈值则取值为0，表明对应城市群之间不存在关联关系；据此得出关联矩阵(表3)，并绘制关联矩阵可视图(图7)。

由表3可见，不同城市群间绿色发展的关联强度存在较大差异。呼包鄂榆和晋中城市群间绿色发展效率的关联强度最强，而宁夏沿黄和晋中城市群间绿色发展效率的关联强度则最弱，前者是后者的33.66倍；这是因为呼包鄂榆城市群不仅绿色发展水平高，而且在基础设施和资源方面占有优势，具备辐射带动邻近城市群的能力[23]，故其能对相隔

表3　黄河流域城市群间绿色发展效率的关联矩阵

Tab. 3　Correlation matrix of green development efficiency among urban agglomerations in the Yellow River Basin

关联特征	城市群	关中平原	中原	宁夏沿黄	兰西	晋中	山东半岛	呼包鄂榆
关联强度	关中平原	–	26.35	11.44	13.13	17.30	10.05	8.71
	中原	14.00	–	3.04	2.61	19.83	16.78	5.16
	宁夏沿黄	6.01	3.01	–	10.33	2.06	5.17	5.49
	兰西	10.80	4.04	16.16	–	4.68	3.19	4.59
	晋中	12.65	27.29	7.20	4.16	–	16.96	29.19
	山东半岛	16.49	51.78	6.43	6.37	38.03	–	24.31
	呼包鄂榆	15.13	16.88	18.15	9.69	69.33	25.74	–
关联矩阵	关中平原	–	1	0	0	1	0	0
	中原	1	–	0	0	1	1	0
	宁夏沿黄	1	0	–	1	0	0	1
	兰西	1	0	1	–	0	0	0
	晋中	0	1	0	0	–	1	1
	山东半岛	0	1	0	0	1	–	1
	呼包鄂榆	0	0	0	0	1	0	–

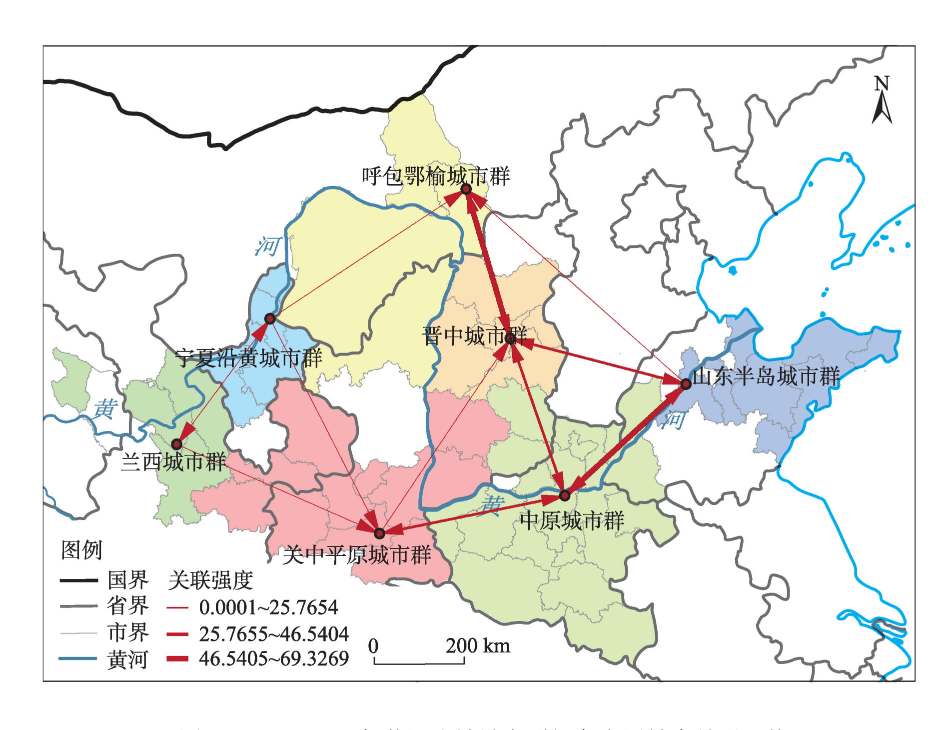


图7　2007—2019年黄河流域城市群绿色发展效率关联网络

Fig. 7　Correlation network of green development efficiency among urban agglomerations in the Yellow River Basin during 2007—2019

较近的晋中城市群产生较强的绿色发展关联关系；而宁夏沿黄城市群的绿色发展水平本身就最低，且与晋中城市群距离较远，其对晋中城市群则较难产生溢出效应；由此可见，绿色发展水平的高低和城市群间的距离是城市群关联关系的重要影响因素。

此外，由图7可见，城市群间绿色发展效率的关联特征有单向溢出关联、双向溢出关联和无关联。存在单向溢出关联的有：关中平原→晋中、宁夏沿黄→关中平原、兰西→关中平原、宁夏沿黄→呼包鄂榆、山东半岛→呼包鄂榆；即箭头前的城市群对箭头所指后方的城市群绿色发展效率有影响，反向则不具有影响关系。存在双向溢出关联的有：中原↔关中平原、中原↔晋中、中原↔山东半岛、晋中↔山东半岛、晋中↔呼包鄂榆、宁夏沿黄↔兰西。其余未涉及的两两城市群组合之间则未表现出明显的关联关系。由此可以发现，绿色发展效率较高的呼包

鄂榆城市群仅对晋中城市群具有单向溢出效应，未对其他城市群产生显著性影响，而绿色发展效率较低、城市群规模较大的中原城市群反而对其他城市群具有显著的绿色发展效率溢出能力；城市群规模较大的山东半岛城市群也对其他城市群有显著的溢出效应；这预示着城市群规模是影响绿色发展效率溢出能力的重要因素。

3.3 黄河流域城市群的均衡特征

通过式(5)分别计算7个城市群的绿色发展均衡度，并结合前文测算的绿色发展效率值，绘制城市群绿色发展效率-均衡度四象限分析矩阵(图8)。结果表明，目前黄河流域七大城市群集中在低效率-高均衡度、低效率-低均衡度和高效率-低均衡度三大象限，城市群绿色发展效率与绿色发展均衡度间存在负相关关系(相关系数为-0.4358，P为0.012)。

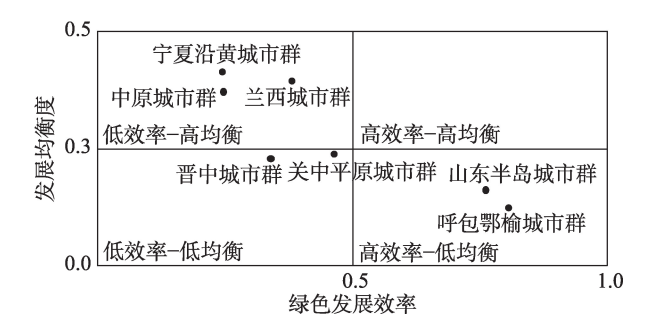


图8　2007—2019年城市群绿色发展效率四象限分析矩阵

Fig. 8　Four-quadrant analysis matrix of green development efficiency of the urban agglomerations during 2007—2019

本文将处于三大象限的城市群进行分类分析。

第一，处在低效率-高均衡度象限的城市群的典型特征是普遍较弱——即城市群内部城市绿色发展效率普遍较低，但均衡度普遍较高。其中，宁夏沿黄城市群最为典型，其绿色发展效率仅为0.2439，均衡度却高达0.4148。这是因为宁夏沿黄城市群所辖城市均属于宁夏回族自治区，发展诉求及规划较为一致，且各城市间绿色发展的协调性较强[24]，故均衡度较高。

第二，处在低效率-低均衡度象限的城市群的典型特征是少强多弱——即城市群内部城市绿色发展效率普遍较低，仅存在少数效率较高的城市。其中，晋中城市群最为典型，其绿色发展效率仅为0.3395，均衡度也仅为0.2288。这是因为晋中城市群生态环境较差[25]，其所辖城市中太原、阳泉和晋中均位列生态环境部通报的2022年上半年全国空气质量状况排名后20位城市之中，故绿色转型任务艰巨，绿色发展效率较低；此外，晋中城市群处于快速发育期，其中心城市尚处于虹吸阶段，与群内其余城市的GDP等绿色发展要素差距正在扩大[26]，这是其均衡度较低的原因。

第三，处在高效率-低均衡度象限的城市群的典型特征是两极分化——即城市群绿色发展效率虽较高，但其内部城市绿色发展差异大，均衡度较低。其中，呼包鄂榆城市群最为典型，其绿色发展效率高达0.8062，均衡度却仅为0.1244。这是因为，据《2019年国内城市群发展分析报告》显示，呼包鄂榆城市群的中心城市处于集聚阶段，对其他城市的辐射带动作用不强，且城市群结构较为松散，内部城市联系较弱，尚未形成整体均衡发展的效应。

4 讨 论

黄河流域城市群的绿色发展涉及一个区域的发展，其绿色发展不仅要求高效，而且要求内部均衡、外部协同，因此与以往研究仅分析绿色发展效率的时空演变特征相比[13-14]，进一步探索城市群之间的关联特征和城市群内部的均衡特征十分有必要。

(1) 关于绿色发展效率的测度，与以往研究相比[8-9]，将用水量纳入投入指标体系更契合黄河流域绿色发展水资源短缺的现实特征。

(2) 关于城市群绿色发展的关联特征，在传统引力模型[21]的基础上引入绿色发展效率，采用修正的引力模型测算黄河流域城市群绿色发展关联强度，对于城市群关联特征研究是一个有益的补充；同时，关于关联特征的分析能够较好地回答城市群间绿色发展是否协同这一问题，为实现绿色发展的跨区域协同提供参考依据。

(3) 关于城市群绿色发展的均衡特征，采用以方差函数为核心的均衡函数来反映城市群内部的绿色发展差异程度，即均衡程度，对于城市群均衡特征研究是一个有益的拓展；同时，关于均衡特征的分析能够较好地回答城市群内部城市的绿色发展是否协调这一问题，对黄河流域精准地因地施策，促进各城市协同发展具有重要的现实意义。

此外，本研究仅基于静态视角分析城市群的关联特征和均衡特征，未来可进一步对此进行动态分析，争取为黄河流域城市群早日实现绿色发展提供更多的科学依据和可行性建议。

5 结论与建议

5.1 结论

（1）时空演变分析表明，黄河流域城市群的绿色发展效率以2014年为界呈现先下降后上升的变化趋势；流域内不同城市群的绿色发展效率存在显著差异；不同时期城市群绿色发展效率的空间格局基本相似，整体呈现低效率空间集聚现象。

（2）关联特征分析表明，不同城市群间绿色发展的关联强度存在较大差异，其关联特征主要有单向溢出关联、双向溢出关联和无关联；此外，本文还发现绿色发展水平、城市群间的距离和城市群规模是影响城市群绿色发展溢出能力的重要因素。

（3）均衡特征分析表明，城市群的绿色发展效率与均衡度之间存在负相关关系，且各城市群在绿色发展效率和均衡度的关系上主要呈现低效率–高均衡度、低效率–低均衡度和高效率–低均衡度3种类型。

5.2 建议

（1）根据不同城市群的基础条件及发展水平精准施策。具体为，呼包鄂榆城市群应重视产业结构单一的问题，推动区域产业结构转型升级，为提升绿色发展效率提供持续的动力；山东半岛城市群应以提高绿色创新水平为重点，推动城市群绿色集约化发展；关中平原和中原城市群作为中西部发展的战略高地，应进一步发挥西安和郑州这2个国家中心城市对区域发展的带动作用，提升城市群整体的绿色发展水平；宁夏沿黄和兰西城市群的发展短板和制约因素较多，应着重扶持对城市群有支撑作用的优势产业，提高资源环境的承载力，为城市群绿色发展创造有利条件。

（2）加强城市群间绿色发展效率空间网络的联动性，形成有效的绿色发展效率提升合力。呼包鄂榆、山东半岛等高效率城市群要加强自身辐射能力，通过先进的绿色生产技术带动邻近城市群绿色发展效率的协同提升；宁夏沿黄等低效率城市群要在承接产业转移时注意防止污染迁移，通过与邻近城市群分工协作来增强绿色发展效率提升合力。

（3）基于各城市群均衡特征进行全局规划，实施因地制宜的绿色发展效率提升战略。具体而言，对低效率–高均衡度的城市群来说，着重考虑通过促进绿色要素在城市间的高效流动来提升城市群绿色发展水平；对低效率–低均衡度城市群而言，一方面要注重积极发展绿色产业以提高绿色发展效率，另一方面要做到区域协同，推动生产要素在城市群间自由流动和优化配置；对高效率–低均衡度的城市群而言，要大力推动人才互动、资源共享等方面的协调工作，依托城市群实现内部城市的深度协作。

参考文献（References）

[1] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 1–8. [Fang Chuanglin. Spatial organization pattern and high-quality development of urban agglomeration in the Yellow River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(6): 1–8.]

[2] 鹿晨昱, 黄萍, 张彤, 等. 甘肃省绿色发展效率时空演化与驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 305–315. [Lu Chenyu, Huang Ping, Zhang Tong, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of the green development efficiency in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 305–315.]

[3] 郭付友, 陈才, 刘志刚. 城市绿色发展效率的空间分异及影响因素: 基于山东省17地市面板数据[J]. 世界地理研究, 2020, 29(5): 1040–1048. [Guo Fuyou, Chen Cai, Liu Zhigang. Evaluation and influence factors of green development efficiency: Based on panel data of 17 cities in Shandong Province[J]. World Regional Studies, 2020, 29(5): 1040–1048.]

[4] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(10): 2027–2044. [Zhou Liang, Che Lei, Zhou Chenghu. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China[J]. Acta Geographical Sinica, 2019, 74(10): 2027–2044.]

[5] 王婧, 杜广杰. 中国城市绿色发展效率的空间分异及驱动因素[J]. 经济与管理研究, 2020, 41(12): 11–27. [Wang Jing, Du Guangjie. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China[J]. Research in Economics and Management, 2020, 41(12): 11–27.]

[6] 卢丽文, 宋德勇, 李小帆. 长江经济带城市发展绿色效率研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 35–42. [Lu Liwen, Song Deyong, Li Xiaofan. Green efficiency of urban development in the Yangtze River Economic Belt[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(6): 35–42.]

[7] 刘曙光, 尚英仕. 中国东部沿海城市群绿色发展效率评价及障碍因子分析[J]. 城市问题, 2020(1): 73–80. [Liu Shuguang, Shang

Yingshi. Green development efficiency evaluation and obstacle factor analysis of coastal city groups in east China[J]. Urban Problems, 2020(1): 73–80.]

[8] 傅春, 欧阳欢蕤, 赵雪茹. 基于DEA及Malmquist指数模型的江西省绿色发展效率测度与评价[J]. 生态经济, 2020, 36(6): 51–57. [Fu Chun, Ouyang Huanrui, Zhao Xueru. Measurement and evaluation on green development efficiency of Jiangxi Province based on DEA and Malmquist index model[J]. Ecological Economy, 2020, 36(6): 51–57.]

[9] 张泽义, 罗雪华. 中国城市绿色发展效率测度[J]. 城市问题, 2019(2): 12–20. [Zhang Zeyi, Luo Xuehua. Measurement of urban green development efficiency[J]. Urban Problems, 2019(2): 12–20.]

[10] 黄杰. 中国绿色发展效率的区域差异及动态演进[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(4): 13–18. [Huang Jie. Regional difference decomposition and its dynamic evolution of green development efficiency in China[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(4): 13–18.]

[11] 车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析[J]. 地理科学, 2018, 38(11): 1788–1798. [Che Lei, Bai Yongping, Zhou Liang, et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China[J]. Sciential Geographical Sinica, 2018, 38(11): 1788–1798.]

[12] Halkos G E, Tzeremes N G, Kourtzidis S A. Measuring sustainability efficiency using a two-stage data envelopment analysis approach [J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(5): 1159–1175.

[13] Chen Y, Qiu F D, Tan J T. Spatial-temporal heterogeneity of green development efficiency and its influencing factors in growing metropolitan area: A case study for the Xuzhou metropolitan area[J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(2): 352–365.

[14] 蔡绍洪, 谷城, 张再杰. 长江经济带绿色发展水平测度及时空演化特征[J]. 华东经济管理, 2021, 35(11): 25–34. [Cai Shaohong, Gu Cheng, Zhang Zaijie. Research on green development level measurement and spatiotemporal evolution characteristics of the Yangtze River Economic Belt[J]. East China Economic Management, 2021, 35(11): 25–34.]

[15] 胡鞍钢, 周绍杰. 绿色发展: 功能界定、机制分析与发展战略[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(1): 14–20. [Hu Angang, Zhou Shaojie. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1): 14–20.]

[16] 杨志江, 文超祥. 中国绿色发展效率的评价与区域差异[J]. 经济地理, 2017, 37(3): 10–18. [Yang Zhijiang, Wen Chaoxiang. Evaluation on China's green development efficiency and regional disparity[J]. Economic Geography, 2017, 37(3): 10–18.]

[17] 孟望生, 张扬. 自然资源禀赋、技术进步方式与绿色经济增长: 基于中国省级面板数据的经验研究[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2314–2327. [Meng Wangsheng, Zhang Yang. Natural resource endowment, path selection of technological progress, and green economic growth: An empirical research based on China's provincial panel data[J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2314–2327.]

[18] 孟望生, 林军. 我国省份资本存量及其回报率估算[J]. 东北财经大学学报, 2015(1): 81–88. [Meng Wangsheng, Lin Jun. Estimation of capital stock and rate of return in my country's provinces [J]. Journal of Dongbei University of Finance and Economics, 2015(1): 81–88.]

[19] 林伯强. 电力消费与中国经济增长: 基于生产函数的研究[J]. 管理世界, 2003(11): 18–27. [Lin Boqiang. Electricity consumption and China's economic growth: Research based on production function[J]. Journal of Management World, 2003(11): 18–27.]

[20] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32–41.

[21] 孟德友, 陆玉麒. 基于引力模型的江苏区域经济联系强度与方向[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 697–704. [Meng Deyou, Lu Yuqi. Strength and direction of regional economic linkage in Jiangsu Province based on gravity model[J]. Progress in Geography, 2009, 28(5): 697–704.]

[22] 刘杨, 杨建梁, 梁媛. 中国城市群绿色发展效率评价及均衡特征[J]. 经济地理, 2019, 39(2): 110–117. [Liu Yang, Yang Jianliang, Liang Yuan. The green development efficiency and equilibrium features of urban agglomerations in China[J]. Economic Geography, 2019, 39(2): 110–117.]

[23] 陈小宁, 白永平, 宋龙军, 等. 黄河流域中上游四大城市群经济联系和网络结构比较分析[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(4): 18–23. [Chen Xiaoning, Bai Yongping, Song Longjun, et al. Comparative analysis of economic link and network structure of the four urban agglomerations in the middle and upper Yellow River Basin[J]. Areal Research and Development, 2021, 40(4): 18–23.]

[24] 马海涛, 徐楦钫. 黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 11–18. [Ma Haitao, Xu Xuanfang. High-quality development assessment and spatial heterogeneity of urban agglomeration in the Yellow River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(4): 11–18.]

[25] 刘海龙, 唐飞, 丁娅楠, 等. 山西省县域高质量发展与生态系统服务耦合的时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1234–1245. [Liu Hailong, Tang Fei, Ding Ya'nan, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of the coupling between county high-quality development and ecosystem services in Shanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1234–1245.]

[26] 宋洁. 新发展格局下黄河流域高质量发展"内外循环"建设的逻辑与路径[J]. 当代经济管理, 2021, 43(7): 69–76. [Song Jie. The logic and path of the "domestic and international circulation" of high-quality development of the Yellow River Basin under the new development pattern[J] Contemporary Economic Management, 2021, 43(7): 69–76.]

Measurement and characterization of green development efficiency in seven urban agglomerations in the Yellow River Basin

MENG Wangsheng[1], LIU Huazhen[2], ZHANG Yang[3]

(1. School of Business, Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. School of Economics, Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. International Business School, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shannxi, China)

Abstract: The green development of the urban agglomerations in the Yellow River Basin of China is crucial to the ecological protection and green high-quality development of the whole basin. This paper uses the super slacks-based model to measure the green development efficiency of cities in the seven urban agglomerations in the Yellow River Basin from 2007 to 2019. It also uses the gravity model and the equilibrium function to characterize the spatiotemporal evolution and to analyze the correlation characteristics of green development among the seven urban agglomerations and the equilibrium characteristics within the urban agglomerations, respectively. The following results were obtained: (1) The green development efficiency of the urban agglomerations exhibits the tendency to drop and then increase, with 2014 as the boundary in terms of time series. (2) The green development efficiency of cities under the jurisdiction of urban agglomeration shows an inefficient spatial clustering pattern in terms of spatial distribution. (3) The strength of the associations of green development varies greatly among different urban agglomerations, and there are three main types of their associations, namely, one-way spillover associations, two-way spillover associations, and no associations. (4) A negative correlation is observed between the green development efficiency of urban agglomerations and their equilibrium degree, and the relationship between green development efficiency and equilibrium degree of each urban agglomeration mainly presents three types, i.e., low-efficiency/high-equilibrium degree, low-efficiency/low-equilibrium degree, and high-efficiency/low-equilibrium degree, in terms of equilibrium characteristics.

Key words: green development efficiency; urban agglomeration; correlation characteristics; equilibrium characteristics; Yellow River Basin